

数据链对多机航空作战效能影响分析评估

陈强¹, 陈长兴¹, 陈婷², 牛德智¹, 程蒙江川¹

(1.空军工程大学理学院,西安,710051;2.西安邮电大学电子信息工程学院,西安,710121)

摘要 针对数据链体制下多机航空作战的航空进程进行研究。在对数法的基础上,给出了数据链体制下的飞机作战效能评估值计算方法,从一致性和等价性的角度出发,将其等效映射为单位化效能值。在单机对抗且能够表征数据链效应的改进 Lanchester 方程空战模型基础上,建立了多机对抗条件下 Lanchester 方程空战模型。从预设的 4 种航空作战场景出发,结合多机对抗的 2 种作战想定,以双机对抗为例仿真分析了 4 种不同场景下的航空作战进程,进一步地分析了数据链的运用对多机空战的影响,给出了空战进程关键节点仿真数据及损耗图,结果表明数据链在多机对抗条件下的航空作战中具有提高作战效能和改变战局的作用,同时在双机对抗航空作战进程中效能大约提升了 35%。

关键词 数据链;效能评估;单位化效能值;多机对抗;Lanchester 方程

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.03.004

中图分类号 V271; TN919 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)03-0016-05

Effectiveness Analysis Evaluation on Force in Air Combat Process Based on Data Link

CHEN Qiang¹, CHEN Changxing¹, CHEN Ting², NIU Dezhi¹, CHEN Mengjiangchuan¹

(1. Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Electron Information Engineering College, Xi'an Institute of Posts Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: The aviation process of multi-plane combat with data link system is studied in this paper. Based on the logarithmic method, a calculation method of air combat effectiveness assessment supported by data link is given and is converted to the average battle effectiveness level which is verified to be equivalent to and consistent with the air combat effectiveness assessment by mathematic theory. Based upon the improved Lanchester equation air combat model which reflects the data link function, a Lanchester air combat model under multi-plane-conflict condition is set up. Based upon the four preset air combat processes and two multi-plane-combat scenarios and with the examples of double-plane confrontation, the air combat process under four different circumstances are simulated and analyzed. Further analysis is made on the influence data link on multi-plane air combat, which provides the simulation data and the exhaustion chart. The result shows that under the data link can improve combat effectiveness and reverse the combat result. Moreover, the double-plane-air-combat effectiveness is raised by about thirty-five percent.

收稿日期: 2015-01-13

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JM8344)

作者简介: 陈强(1989-),男,江西南昌人,硕士生,主要从事数据链系统效能评估及影响分析研究.E-mail:cqky1989@126.com

引用格式: 陈强,陈长兴,陈婷,等.数据链对多机航空作战效能影响分析评估[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(2):16-20. CHEN Changxing, CHEN Qiang, CHEN Ting, et al. Effectiveness Analysis Evaluation on Force in Air Combat Process Based on Data Link[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(3): 16-20.

Key words: data link; effectiveness evaluation; average combat level; Lanchester equation

随着信息技术日臻成熟和完善,数据链凭借其强大的信息支持能力在航空作战中发挥着中枢神经的作用,因其信息支持能力延伸下的战场态势共享及高效的武器协同能力而备受青睐^[1-5]。基于此,针对数据链体制下的作战飞机进行合理的效能评估,将效能评估结果运用到作战实践,继而研讨数据链“倍增器”优势下的空战双方兵力数量和结构变化^[1,5],并由此尝试研究航空作战体系化对抗建模、分析空战兵力损耗率、科学研判战斗终结时胜负结果及分析战败方作战进程中最佳增援决策节点。

现有的文献中涉及的作战飞机效能评估及数据链信息优势影响分析问题均缺乏一个闭环思路的观念,没有将效能评估的结果应用到具体的作战实践场景中去,只是单纯考虑数据链信息优势支持下作战飞机在航空作战中的毁伤效能评估问题^[6-10],或者为了便于分析,忽略数据链优势,直接研究置于不同作战场景下航空作战兵力数量和结构对比问题^[1,5],上述研究造成了效能评估到实践应用反馈环路没有有效衔接^[1,5],缺乏航空作战体系化。

本文将作战飞机效能评估结果及作战运用两者有效结合,着重研究数据链体制下多机对抗的兵力变化关系。

1 飞机作战的单位化效能值

1.1 空战参数聚合法

通常飞机作战的效能由空战能力指数来表征,故采用计算空战能力指数的方法^[11],具体聚合参数表达式为:

$$I = [\ln C + \ln(\sum D + 1) + \ln E] \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 \epsilon_4 \quad (1)$$

式中: I 为空战能力指数; C 为机动性能参数; D 为火力性能参数; E 为发现目标能力参数; ϵ_1 为生存能力系数; ϵ_2 为电子对抗能力系数; ϵ_3 为航程系数; ϵ_4 为飞行员操纵效能系数。

数据链信息优势下的空战能力指数模型为:

$$I' = [\ln C' + \ln(\sum D + 1) + \ln E'] \epsilon_1' \epsilon_2' \epsilon_3' \epsilon_4' \quad (2)$$

式中: E' 和 ϵ_2' 分别为装备数据链后的发现目标能力参数和电子对抗能力参数,现定义 λ_1 、 λ_2 分别为引入数据链后这 2 项参数的提升率,则 E' 和 ϵ_2' 分别可以用下式来表示:

$$\begin{cases} E' = E(1 + \lambda_1) \\ \epsilon_2' = \epsilon_2(1 + \lambda_2) \end{cases} \quad (3)$$

根据文献^[13]的有关结论, λ_1 可以表示为:

$$\lambda_1 = \frac{\Delta S}{S} = \frac{\frac{\varphi}{360}(\pi r^2 - \pi(r-d)^2)}{\frac{\varphi}{360}\pi r^2} = \frac{(2r-d)d}{r^2} \quad (4)$$

式中: φ 为雷达搜索的方位角参数; r 为雷达探测距离参数; d 为双机之间距离参数($d < r$)。

针对 λ_2 的取值,在借鉴文献^[12]的基础上给出了其统一赋值的依据和处理办法。同时在数据链支持下的电子信息设备,还会提升其抗干扰性能及投放能力。所以为了突出数据链支持下的信息优势可以适当调整赋值差^[5]。

1.2 飞机作战效能的归一化映射

空战能力指数 I 经过式(5)的等效变换映射为在区间(0,1)上的单位化效能值 γ 。

$$\gamma = \sin\left(\frac{kI}{kI+1} \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

式中: $k > 0$ 为一比例调节因子,其作用是使变换后的 γ 在数值上有一定差距,为后续仿真验证部分提供合理的数据支持; γ 和 I 在空战能力表述上是一致的,并且 γ 和 I 具有相同的单调性。

2 改进的 Lanchester 多机空战模型

Lanchester 方程是通过构建微分方程模型的方式来体现对抗双方人员(武器装备)数量或者性能随进程变化^[10,13]。本文将结合 Lanchester 方程仿真分析不同作战场景下的动态兵力数量变化过程:

$$\begin{cases} dR/dt = -\alpha B \\ dB/dt = -\beta R \end{cases} \quad (6)$$

式中: t 为时间; R 、 B 分别为红、蓝方在时刻 t 的战斗单位数量; α 、 β 分别为蓝、红方每个战斗单位的单位化效能值,可由式(5)求出。

在单机对抗的基础上结合 Lanchester 方程,给出不同数量多机型对抗的数学模型表达式:

$$\begin{cases} dR_j/dt = -\sum_{k=1}^K \alpha_{k,j} B_k \\ dB_k/dt = -\sum_{j=1}^J \beta_{j,k} R_j \end{cases} \quad (7)$$

式中各参数含义详见文献^[1,5]。本文以双机对抗为例探寻多机对抗的数量变化规律及在数据链体制下的航空进程变化。在式(7)的基础上,对公式进行相应变化,得出双机对抗建模的具体表达为:

$$\begin{cases} dR_1/dt = -(\alpha_{11}B_1 + \alpha_{21}B_2) \\ dR_2/dt = -(\alpha_{12}B_1 + \alpha_{22}B_2) \\ dB_1/dt = -(\beta_{11}R_1 + \beta_{21}R_2) \\ dB_2/dt = -(\beta_{12}R_1 + \beta_{22}R_2) \end{cases} \quad (8)$$

式中 R_1, R_2, B_1, B_2 分别表示红蓝双方的各机型战斗单元数量,根据 Lanchester 方程的假设此处认为 $\alpha_{11} = \alpha_{12}, \alpha_{21} = \alpha_{22}, \beta_{11} = \beta_{12}, \beta_{21} = \beta_{22}$ 。在此基础上,对式(8)进行相应变化,具体表达式为:

$$\begin{cases} dR_1/dt = -(\alpha_1 B_1 + \alpha_2 B_2) \\ dR_2/dt = -(\alpha_1 B_1 + \alpha_2 B_2) \\ dB_1/dt = -(\beta_1 R_1 + \beta_2 R_2) \\ dB_2/dt = -(\beta_1 R_1 + \beta_2 R_2) \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 分别为蓝、红各自两型飞机的单位化效能值。考虑到双方机型实力差距及在数据链体制下的实力提升,作战双方损耗情况都不尽相同。假定初始条件为红军实力总体偏弱,本文设想了2种空战想定。

想定1:红方总体实力偏弱,空战进程中红方实力稍弱的一型飞机提前消亡。接下来则依照下式进行兵力衍化(以 R_1 实力稍强为例):

$$\begin{cases} dR_1/dt = -(\alpha_1 B_1 + \alpha_2 B_2) \\ dB_1/dt = -(\beta_1 R_1 + \beta_2 R_2) \\ dB_2/dt = -(\beta_1 R_1 + \beta_2 R_2) \end{cases} \quad (10)$$

在二对一的空战进程中,有2种作战情形:①一种红方加速损耗直到战斗终结;②红方数量占优导致蓝方一型飞机数量为零。则双方空战进程依照下式变化(以 B_2 数量首先为零为例):

$$\begin{cases} dR_1/dt = -(\alpha_1 B_1 + \alpha_2 B_2) \\ dB_2/dt = -(\beta_1 R_1 + \beta_2 R_2) \end{cases} \quad (11)$$

在此阶段的航空作战进程中,依照式(13)的数学模型衍化规律,最后以蓝方胜利结束战斗。

想定2:由于数据链的引入红方单位化效能值提升,在空战进程中蓝方一型提前消亡。在数据链体制下的空战规律则依照下式进行数量变化(以 B_2 提前退出战斗为例):

$$\begin{cases} dR_1/dt = -(\alpha_{11}B_1 + \alpha_{21}B_2) \\ dR_2/dt = -(\alpha_{12}B_1 + \alpha_{22}B_2) \\ dB_1/dt = -(\beta_{11}R_1 + \beta_{21}R_2) \end{cases} \quad (12)$$

在引入数据链后红方实力得到提升,但是在具体作战情形中,假定蓝方一型飞机总体实力依然占优,则设想蓝方损耗速率小于红方其中一种机型,则空战进程发生变化。具体的兵力数量变化规律由式(11)给出,只是机型种类有所不同。

数据链体制下的兵力预测需要具体分析,上述只是简单分析了数据链引入后的衍化规律,如若双方均加装数据链或总体实力较强一方引入数据链,这一情况的变化规律还要通过单位化效能值来衡量,进而依照对应的数学表达式来衍化。

3 仿真验证与分析

在多机对抗的仿真实验中(以双机对抗双机为例说明),首先确定作战双方的机型及初始值,之后根据求解出的空战能力指数的基础上向单位化效能值转化。本文假定红、蓝双方机型为 F/A-18C、米格-29 和 F-16C、F-15E,对应数量分别为[10 15 10 15]。所以仿真中设置了4种不同的场景,即红蓝双方均未加装数据链、仅红方加装数据链、仅蓝方加装数据链、红蓝双方均加装数据链。

以米格-29为例,其机载探测设备装备的雷达型号^[5]为 AWG-9,最大探测距离为 160 km,当红方配备数据链支援协同作战时的距离为 100 km 时,依据式(3)和式(4)可求得 $\lambda_1 = 0.86$ 。为了简化运算程序和分析问题的需要,以下其他3种机型的 λ_1 均设定为 0.86,这与实际情况略有出入但差别不大,结果基本不受影响。设定红、蓝方的电子对抗能力分别为[1.05 1.05 1.05 1.2],红蓝双方4种机型分别加装数据链后,其电子对抗能力均设定为 2.0。以上假设均为控制相同变量,体现数据链体制下对整体作战能力的提升作用。4种机型效能评估指标中的其余参量参照文献[11],依照式(1)~(5)可以得到效能评估值(包括空战能力指数、单位化效能值),见表1。

表1 效能评估值及对应的飞机作战效能参数

Tab.1 Air combat effectiveness parameters and evaluation values

战斗单元	机型	C	D	E	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	I	I'	γ	γ'
R_1	F/A-18C	19.5	149	1 144	0.94	1.05	1.065	0.95	15.002 3	29.755 5	0.600 0	0.748 5
R_2	米格-29	27.12	2 492	667	0.94	1.04	1.01	0.84	15.091 6	29.753 3	0.601 2	0.748 5
B_1	F-16C	26.7	2761	720	1	1.05	1.05	0.9	17.649 8	34.790 9	0.638 3	0.776 7
B_2	F-15E	25.5	2 761	1 514	0.915	1.20	1.55	0.9	28.313 5	48.772 6	0.739 0	0.829 9

从表 1 可知,数据链的加装对空战整体实力即空战能力指数及单位化效能值都有极大的提升。下面从预设的 4 种场景出发,基于“红弱”的初始状态仿真分析双方兵力数量及结构变化,重点验证数据链信息优势对多机空战的影响及作战应用。

3.1 多机航空作战进程预测

仿真参数设置见表 1,空战能力指数分别取 $[0.600\ 0\ 0.601\ 5\ 0.638\ 3\ 0.739\ 0]$ 、 $[0.748\ 5\ 0.748\ 5\ 0.638\ 3\ 0.739\ 0]$ 、 $[0.600\ 0\ 0.601\ 5\ 0.776\ 7\ 0.829\ 9]$ 、 $[0.748\ 5\ 0.748\ 5\ 0.776\ 7\ 0.829\ 9]$ 。采用 Runge-Kutta 数值积分方法求解微分方程组式(8)~(10)。在 MATLAB 中编程,对抗双方分别在 4 种作战场景下的空中战斗兵力数量变化(动态损耗),得到战斗动态损耗曲线如图 1~图 4。图中的横坐标表示时间单位(战斗进程),纵坐标表示作战单元数量。

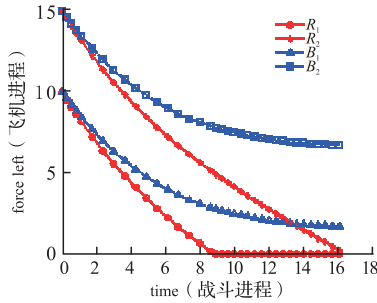


图 1 飞机数量动态损耗图(红蓝双方均未加装数据链)

Fig.1 Dynamic exhaustion for both sides without data link

由图 1 可以看出,虽然战斗单位数量总体相等,但是红方单位化效能值不及蓝方,红方机群损耗率明显大于蓝方机群,直至红方机群较弱机型(F/A-18C)消亡。而蓝方机群损耗率随战斗进程的推进趋于平缓,当战斗进程为 8.6 时,由于受到蓝方 2 种机型的攻击,红方机群(米格-29)加速损耗,直到战斗终结(以红方的失败而告终)。

图 2 通过引入数据链终端,红方机群战斗实力显著提升,使战局发生了根本性扭转。红方机群损耗率逐渐放缓,当战斗进行到 9.199 时刻时,蓝方实力偏弱的机型飞机数量为 0。红方机型(F/A-18C)虽然加装数据链但总体实力偏弱,在 14.576 时刻时消亡,当战斗进行至 21.8 时刻时战斗以红军胜利结束。从本节仿真可以看出,数据链的使用扭转了战局结果,延缓了战斗的进程。

图 3 通过引入数据链终端,蓝方机群战斗实力显著提升,使战斗进程提前结束。红方机群损耗率急剧增加,战斗进程显著加快,当战斗进行到 11.721 时刻时,以红方的加速损耗结束。从本节仿真可以看出,数据链的使用极大地增强了实力偏强一方的平均战斗水平,加剧了偏弱一方的损耗,提前结束了战斗的进程。

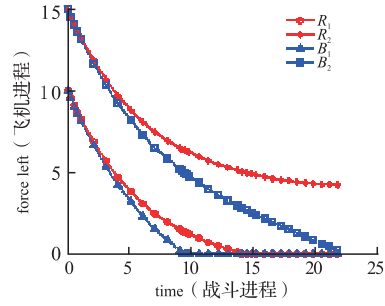


图 2 双方飞机数量的动态损耗图(仅红方加装数据链)

Fig.2 Dynamic exhaustion for both sides (data link only brought in by R)

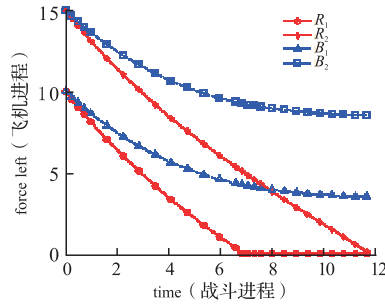


图 3 双方飞机数量动态损耗图(仅蓝方加装数据链)

Fig.3 Dynamic exhaustion for both sides (data link is only brought in by B)

图 4 双方均引入了数据链终端,双方实力显著增强,延缓了航空作战的战斗进程。当战斗进行至 7.869 时刻时实力偏弱一方飞机剩余数量为 0,对比图 1 可以看出数据链的引用加剧了实力偏弱一方的消亡。红方米格-29 与蓝方 F-16C 引入数据链后单位化效能值相差无几,但是红方数量上占优,所以对图 1 可以看出红方“迟滞”“延缓”了战斗进程,损耗率明显小于蓝方 F-16C,直至 17.829 时战斗以消灭蓝方飞机结束。本节仿真可以看出,数据链的引入“迟滞”“延缓”了战斗进程,改变了战斗过程。虽然实力上不占据优势,但是对战斗进程起到“延缓”作用,从而获取了后续增援策应的战机,进而改变作战结局。

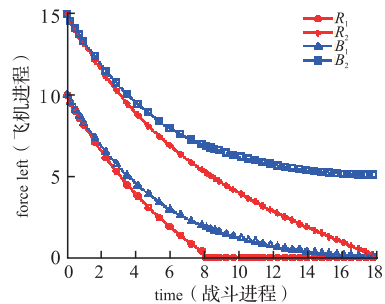


图 4 双方飞机数量动态损耗图(红蓝双方均加装数据链)

Fig.1 Dynamic exhaustion for both sides with data link

3.2 “折损点”“终结点”及“损失量”分析

为了更好的分析数据链的引入对“优势方”的

“加速”及对“偏弱方”的“迟滞”“延缓”作战进程作用,本文定义“折损点”为战斗进程双机对抗过程中某一机型数量首先损耗到零的时刻点,“终结点”为战斗结束的时刻点,“损失量”为航空作战全过程飞机损失的总量。表2为预设4种场景下的仿真数据(粗体部分表示终结点各型飞机剩余数量及战斗终结损失量)。

表2 预设场景的“折损点”“终结点”及“损失量”

Tab.2 Aircraft number of reinforcement and damage for R

	Time	R_1	R_2	B_1	B_2	Loss
Red-NDL	8.65	0	5.145	2.848	7.848	44.159
Blue-NDL	16.13	0	0	1.682	6.682	51.636
Red-DL	9.19	1.418	6.418	0	5.094	47.07
Blue-NDL	21.88	0	4.196	0	0	55.804
Red-NDL	6.61	0	5.32	4.30	9.300	41.08
Blue-DL	11.72	0	0	3.482	8.482	48.036
Red-DL	7.86	0	5.361	1.929	6.929	45.781
Blue-DL	17.82	0	0	0	5.05	54.95

由图5下半部分曲线(图中实线部分)即“折损点”部分可以看出数据链的引入加剧了航空作战双方对抗的激烈程度,双方飞机数量损耗显著增加,同时红方加装数据链后“迟滞”“延缓”了作战进程即“终结点”明显延迟。“终结点”部分(图中虚线部分)可以看出红方数据链的引入致使“损失量”数值较高,“终结点”时刻明显延后,实力占优一方即蓝方数据链的引入显著缩短了航空作战进程,提前结束战斗同时“损失量”较小。与此相反实力偏弱一方即红方数据链的引入“迟滞”“阻碍”了战斗进程,“延缓”了战斗“终结点”同时“损失量”明显增加。

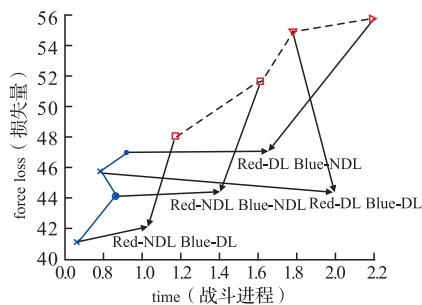


图5 “折损点”“终结点”及“损失量”曲线图

Fig.1 Curve of ‘wreck point’, ‘destination point’ and ‘aircraft number of loss’

4 结语

本文基于数据链体制的多机空战进程预测,着重研究了有无运用数据链对作战效能影响分析,这也是对数据链进行相关性能研究及效能评估的最终落脚点。本文只是单纯研究了数据链体制对航空作

战的影响,下一步将针对多机对抗条件下的增援问题进行更加全面的研究。

参考文献(References):

- [1] 牛德智, 陈长兴, 徐浩翔, 等. 基于数据链的飞机效能评估及作战运用[J]. 电子技术应用, 2014, 40(7): 103-108.
NIU Dezhi, CHEN Changxing, XU Haoxiang, et al. Effectiveness Evaluation for Aircraft and Combat Application Based Data Link [J]. Communication and Network, 2014, 40(7): 103-108. (in Chinese)
- [2] Enel L, Guillem F. Improvements in Navy Data Networks and Tactical Communication Systems [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2006, 18: 97-101.
- [3] Gray F B, L’Hommedieu W R. A Combat-Effectiveness Approach to Information Assurance[R]. AIAA 2010-1748.
- [4] Lee J, Kang S H, Rosenberger J, et al. A Hybrid Approach of Goal Programming for Weapon Systems Selection [J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(3): 521-527.
- [5] 牛德智, 陈长兴, 班斐, 等. 基于效能评估的航空作战进程预测[J]. 航空学报, 2014, 35(5): 1416-1423.
NIU Dezhi, CHEN Changxing, BAN Fei, et al. Prediction on Force in Air Combat Process Based on Data Link [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(5): 1416-1423. (in Chinese)
- [6] 陈健, 穆永鹏, 李登峰. 舰艇编队武器协同使用效果评估研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2009, 23(3): 66-71.
CHEN Jian, MU Yongpeng, LI Dengfeng. Study on Effect Evaluation of Weapon Coordinated Use of Fleet [J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2009, 23(3): 66-71. (in Chinese)
- [7] Liu H, Xu M, Chen N Y, et al. Task Effectiveness Evaluation on Anti-ship Attack of Fighter Aircraft [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 29(2): 164-170.
- [8] 谢文才, 罗雪山, 罗爱民. 基于元模型的军事信息系统体系结构建模方法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(1): 82-87.
XIE Wencai, LUO Xueshan, LUO Aimin. Meta-model Based Modeling of Military Information System Architecture [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(1): 82-87. (in Chinese)

(下转第 29 页)

- CONG Wei, JING Bo. Development and Revelation of USAF Air Combat Training System[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(7): 55-59. (in Chinese)
- [5] Blair W D, Rice T R, Alouani A T, Xia P. A Synchronous Data Fusion for Target Tracking with A Multitasking Radar and Optical Sensor[C]//In Proceedings of the 1991 SPIE Conference on Acquisition, Tracking and Pointing V. Orlando, FL, USA, 1991.
- [6] 李教. 多平台多传感器多源信息融合系统时空配准及性能评估研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- LI Jiao. Temporal and Spatial Alignment and Performance Assessment for Multi-Platform Multi-Sensor and Multi-Source Information Fusion System [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2012. (in Chinese)
- [7] 田雪怡. 多传感器数据关联与航迹整合技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- TIAN Xueyi. The Technology Research of Multi-Sensor Data Association and Track Fusion[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [8] Dhar S. Application of A Recursive Method for Registration Error Correction in Tracking with Multiple Sensors[C]//In Proceedings of the 1993 American Control Conference. San Francisco, CA, 1993.
- [9] 贺席兵. 信息融合中多平台多传感器的时空对准研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
- HE Xibing. Research on Space and Time Registration of Multi-Platform Multi-Sensor in Information Fusion [D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2001. (in Chinese)
- (编辑: 徐敏)

.....

(上接第 25 页)

- [9] 赵伟, 伞冶. 基于 q -高斯的模糊神经网络在飞机作战效能评估中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(6): 674-678.
- ZHAO Wei, SAN Ye. Fuzzy Neural Network Based On q -Gaussian and Its Application in Operational Effectiveness Evaluation of Planes[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(6): 674-678. (in Chinese)
- [10] 陈向勇, 井元伟, 李春吉. 基于 Lanchester 方程的作战混合动态系统最优变招控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(6): 773-777.
- CHEN Xiangyong, JING Yuanwei, LI Chunji. Optimal Variable Tactic Control of Warfare Hybrid Dynamic System Based on Lanchester Equation[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(6): 773-777. (In Chinese)
- [11] 杨磊. 战术数据链协同分层模型及效能评估方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- YANG Lei. Research on Tactical Data Link Interoperable Layered Model and Efficiency Evaluating Method [D]. Chanshan: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [12] 朱宝璠, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 2版. 北京: 航空工业出版社, 2006: 63-64.
- ZHU Baoliu, ZHU Rongchang, XIONG Xiaofei. Aircraft Effectiveness Evaluation [M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2006: 63-64. (in Chinese)
- [13] 黄俊, 孙义东, 武哲, 等. 战斗机对地攻击作战效能分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(3): 354-357.
- HUANG Jun, SUN Yidong, WU Zhe, et al. Operational Effectiveness Analyses of Air-to-ground Strike for Battle-plane[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(3): 354-357. (in Chinese)
- (编辑: 徐敏)